

Efecto del cambio de corrugado en aletas helicoidales sobre el número de Nusselt

Corrugate change effect in helical fins over the Nusselt number

López, Emilio *, Simeone, Rolando ², Iturriza, Hermes ¹.

¹ Departamento Física Universidad Pedagógica Experimental Libertador
Instituto Pedagógico “Rafael Alberto Escobar Lara”
Universidad Politécnica Territorial de Aragua.
República Bolivariana de Venezuela. Estado Aragua.

² Universidad de Holguín Oscar Lucero Moya. Facultad de Ingeniería.
Dpto. de Mecánica. Cuba. Holguín
*nikoclaudia5464@gmail.com

Resumen

Este artículo tiene como propósito ilustrar la comparación del efecto que causa el cambio de corrugado sobre el número de Nusselt en dos niveles de corrugados. Se trabajó con aletas helicoidales a las cuales se les modificó su superficie al utilizar el corrugado, para lo cual se realizaron cuatro experimentos con intercambiadores de calor de tipo flujo cruzado, los cuales se sometieron a pruebas en las que se consideró el corrugado de paso 6,70 mm, así como el número de aletas por unidad de longitud. Los resultados experimentales obtenidos muestran que el corrugado sobre la superficie de las aletas aumenta la magnitud del número de Nusselt de 60 % hasta un 900 %, y la caída de presión superior a 300 %, para ambos casos en relación a los valores que se obtienen para aletas anulares lisas descritas en la literatura y bajo las mismas condiciones de operación.

Palabras clave: Intercambiador de calor, aletas, helicoidal, corrugado, Nusselt.

Abstract

This goal of this paper is to illustrate the comparison of results of corrugate change effect in helical fins over the Nusselt number in two corrugated levels. The research was with two helical fins, both were modified its surfaces by corrugate process, with this purpose were made four experiments using cross flow heat exchangers each one of them were setting up by a test of corrugate of step 6,70 mm and also with number of fins for unit of longitude. The experimental results obtained shows that the corrugated on the surface of the fins increases the magnitude of Nusselt number in the range of 60 % to 900 %, and pressure decreases over 300 %, compared with flat fins O-ring type values that it was mentioned in different references, in all cases working under same conditions.

Key words: Heat exchanger, fins, helical, corrugates, Nusselt.

1 Introducción

En la industria se utilizan diferentes tipos de intercambiadores de calor tales como los tubos carcasa y los flujos cruzados. Entre los flujos cruzados se pueden encontrar equipos fabricados con diferentes tipos de superficies extendidas, entre los que se destacan los elaborados con aletas helicoidales corrugadas. Las aletas helicoidales corrugadas datan del año 1926 (Berg 1926) y surgieron de la necesidad de agilizar el proceso de producción de los tubos aleteados con aletas anulares lisas. Pero en el año 1938 apareció un

nuevo diseño en el cual se hizo más pronunciado el corrugado en la superficie de la aleta helicoidal (Niemchek 1938). Con el uso de este proceso de producción de tubos de aletas helicoidales corrugadas se disminuía los tiempos de fabricación. El corrugado era producto del proceso de fabricación y se encontraba concentrado en la base de la aleta. Para la época el corrugado fue considerado un efecto no deseado y en el año 1947 otro autor Chapman (Chapman 1947) diseñó y fabricó tubos de aletas helicoidales con el corrugado minimizado y distribuido hacia el extremo de la aleta helicoidal. En la figura 1 se puede observar la evolución de las aletas helicoidales en el tiempo.

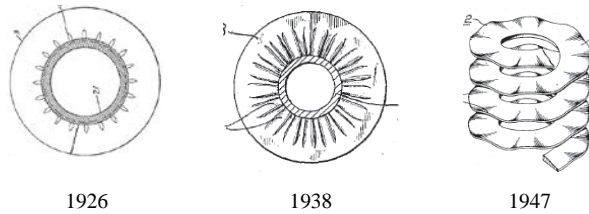


Fig. 1. Ilustración de la evolución de las aletas helicoidales corrugadas.

Hoy en día el corrugado es un efecto que se considera necesario ya que incrementa el número de Nusselt y así el coeficiente de transferencia de calor por convección, lo cual puede permitir intensificar la transferencia de calor. Para lograr esto se ha extendido el corrugado de forma controlada a toda la superficie de la aleta helicoidal. Estudios realizados sobre el efecto del corrugado de paso 7,422 mm de aletas helicoidales, demostraron que el coeficiente de transferencia de calor por convección del lado de las aletas se incrementa considerablemente comparado con aletas anulares lisas, así como, la caída de presión (López 2006). Este efecto de intensificación de la transferencia de calor ha sido estudiado por otros autores en diferentes tipos de aletas, incluidas las anulares, lo cual se pone de manifiesto en las referencias (Nir 1991, Pacheco y col., 2001).

La fabricación de intercambiadores de calor de aletas helicoidales con corrugado controlado no es una práctica común a nivel mundial. En la figura 2 se muestra la aleta helicoidal con corrugado controlado extendido a toda la superficie y dos niveles de corrugados de paso 6,74 mm y paso 7,42 mm.

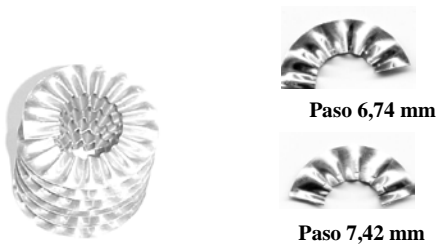


Fig. 2. Aletas helicoidales con corrugado extendido de paso 6,74 mm y paso 7,42 mm.

Para el diseño de intercambiadores de calor de aletas helicoidales corrugadas, tanto fabricantes como universidades y centros de investigación, coinciden en emplear el procedimiento de diseño para aletas anulares lisas y helicoidales lisas propuesto por los autores (Kern 1999, Pysmenny y col., 2007) respectivamente, siendo el primero el más utilizadas en la industria debido a sus aplicaciones. Existen otras metodologías que pueden ser utilizadas en el diseño de intercambiadores de calor de aletas anulares lisas, para lo cual se pueden consultar a (Incropera y col., 1996, Holman 1999), entre otras.

Este artículo tiene como propósito Ilustrar la comparación del efecto que causa el cambio de corrugado sobre el número de Nusselt en dos niveles de corrugados.

2 Materiales y métodos

Para lograr lo antes mencionado se diseñaron y fabricaron intercambiadores de calor con aletas de corrugado con paso 6,74 mm y se siguió el procedimiento sugerido para aletas anulares lisas dado por (Kern 1999), además, se modificó el número de aletas, se conservaron fijos la altura de la aleta, el espesor, los materiales de fabricación, así como, el diámetro exterior del tubo y la fuerza de fijación de las aletas con el tubo.

Los equipos tienen dimensiones tales que permiten obtener variaciones de temperaturas significativas entre la entrada y salida que permiten ser evaluados. El corrugado de la aleta, está dado por un juego de engranajes, mientras que la cantidad de aletas se corresponde con el paso entre ellas. Los equipos fueron puestos en un banco de prueba en el cual se desarrolló la experimentación. El mismo fue diseñado y fabricado para las condiciones requeridas en esta investigación y verificado su funcionamiento y capacidad de medición con un intercambiador de calor de tubos circulares sin aletas, para lo cual se siguió los procedimientos de diseño y fabricación referidos en las literaturas especializadas (Holman 1999, Taborek 1985).

Los equipos fabricados fueron sometidos a pruebas en las que se midieron la temperatura, presión y caudales requeridos para la evaluación del número de Nusselt del lado de las aletas. Los resultados reportados en (López 2006) comprobaron que el corrugado tiene influencia directa en el coeficiente de transferencia de calor, así como, en la caída de presión.

La abreviatura **COR** significa corrugado, mientras que el número reseña el paso del engranaje con el cual se conformo el corrugado. La cantidad de aletas se corresponde con el paso entre las mismas. Entonces COR39 significa que es un intercambiador de calor fabricado con tubos con aletas helicoidales con corrugado conformado con el engranaje 3 cuyo paso entre diente es de 6,740 mm y con un paso entre aletas de 3 mm que define una cantidad de aletas por unidad de longitud (8,41 aletas/pulg). Para simplificar la nomenclatura, en lugar de trabajar con la cantidad de aletas por unidad de longitud, se opta por incorporar lo que se denomina número de referencia. En Tabla 1 se observa el paso del engranaje para producir los niveles de corrugado COR2 y COR3. En la Tabla 2 se puede ver como para cada paso entre aletas existe una cantidad de aletas por unidad de longitud y un número definido utilizado como referencia de calor por convección (h) en aletas helicoidales al variar el grado de corrugado desde COR 2 a COR1.

Tabla 1. Paso de los engranajes

Tipo	Paso (mm)
COR2	7,422
COR3	6,740

Tabla 2. Paso y Número de aletas

Paso (mm)	Número de Aletas/pulg.	Número de Referencia
5,5	4,62	5
4	6,4	7
3	8,41	9
2,47	10,24	11

Los equipos ensayados se fabricaron con los siguientes materiales:

Material de Tubo: **Aluminio ϕ 5/8 pulg. BWG 18**
 Material de Aleta: **Aluminio 1100 O.**
Dimensiones Altura 10 mm.
Espesor 0,41 mm.

El banco de prueba responde a los parámetros requeridos para lo cual fue diseñado y fabricado, tales como, producir una mínima diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de los fluidos de trabajo de los intercambiadores de calor en el orden de 5 °C, el fluido calefactor fue aire y refrigerante agua, entre otros parámetros.

La instrumentación diseñada para el banco está conformada de la siguiente manera: para la medición de las temperaturas se utilizó un sistema de adquisición de datos con capacidad de coleccionar 16 puntos diferentes de temperatura con un rango de 20 a 150 °C. Para medir el caudal de aire y agua se utilizó un tubo Pitot y un tubo de presión total, respectivamente, con su correspondiente curva de calibración caudal vs altura. Para la caída de presión se emplearon manómetros diferenciales cuyo fluido manométrico fue alcohol. A continuación se muestra un esquema del aparato experimental y de las lecturas del sistema de adquisición de datos.

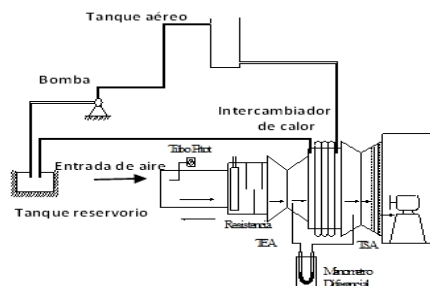


Fig. 3. Esquema del banco de ensayos experimentales.

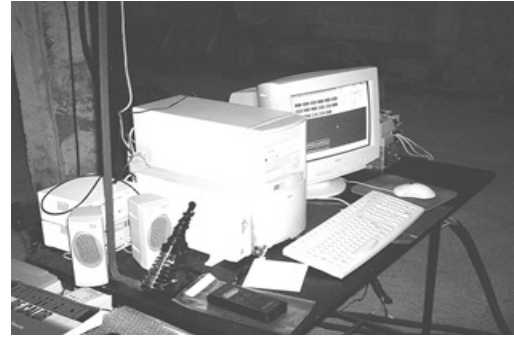


Fig. 4. Sistema de adquisición de datos para temperaturas.

Los intercambiadores de calor fabricados fueron sometidos a pruebas en las cuales se midieron la temperatura, presión y caudales requeridos para la evaluación del número de Nusselt del lado de las aletas. Las gráficas se realizaron siguiendo el procedimiento empleado en (López 2006).

3 Resultados Experimentales COR3

Los resultados experimentales se ilustran en un conjunto de figuras que se discuten a continuación. La figura 5 muestra que el número de Nusselt obtenido para aletas helicoidales corrugadas COR35 es superior al calculado para aletas anulares lisas. De igual manera se puede observar que la caída de presión para las aletas COR35 es superior al determinado para aletas anulares lisas

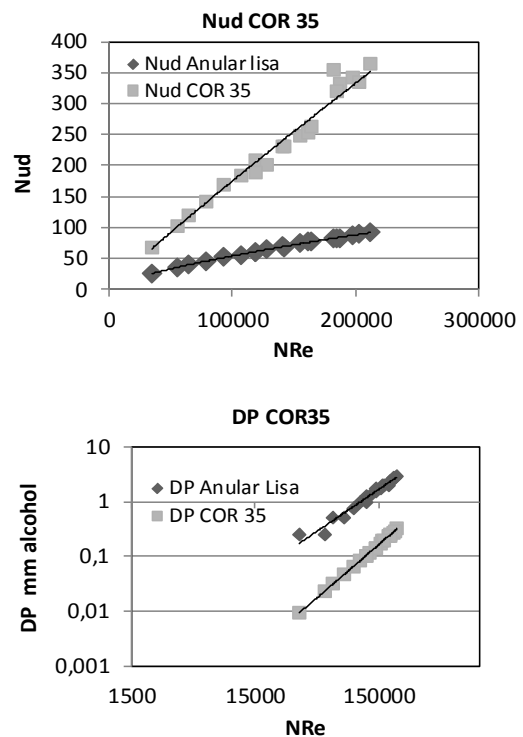


Fig. 5. Número de Nusselt y caída de presión COR35.

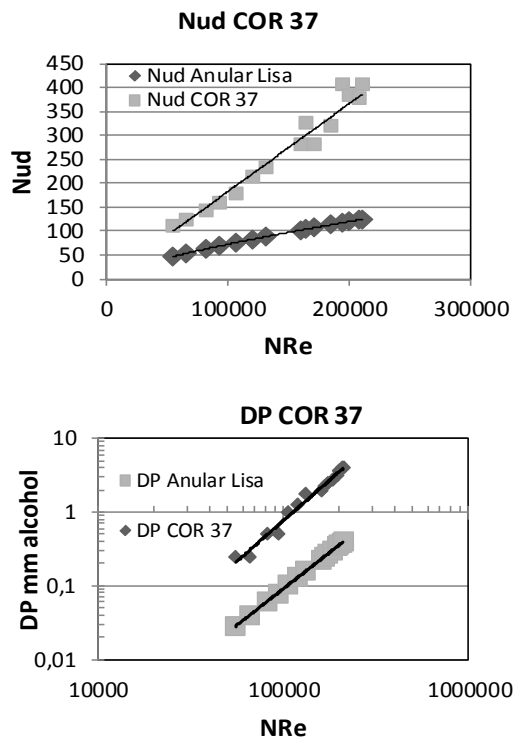


Fig. 6. Número de Nusselt y caída de presión COR37/

La gráfica correspondiente a los valores de Nusselt y caída de presión para el caso COR37 se muestran en las figuras 6, donde nuevamente se puede observar que ambos valores son superiores para el caso de aletas corrugadas comparados con el de aletas anulares lisas para el mismo arreglo, mostrando un patrón similar de comportamiento que el caso anterior.

En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos para el caso COR39, donde el número de Nusselt y la caída de presión son superiores a los valores calculados según el procedimiento propuesto para aletas anulares lisas, siendo este resultado esperado.

En la gráfica de la figura 8 se muestra los resultados experimentales obtenidos para el caso COR311. Los valores tanto del número de Nusselt Nud como de la variación de presión registrados experimentalmente son superiores a los determinados para aletas anulares lisas. Se debe destacar que para valores de número de Reynolds NRe superiores a 10^5 , en la curva correspondiente Nud para COR 311 presenta un cambio brusco de pendiente, lo cual incrementan el número de Nusselt.

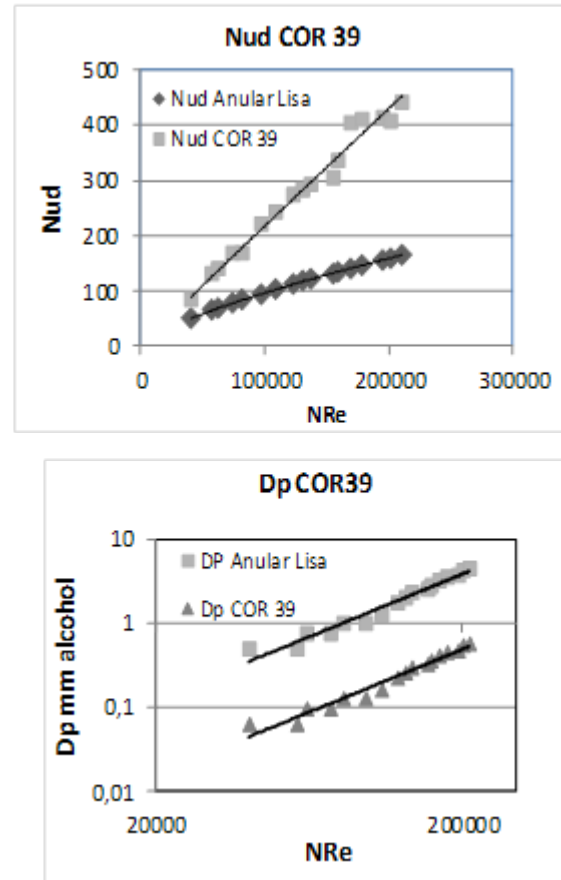


Fig. 7. Número de Nusselt y caída de presión COR39.

En la figuras 9 se presenta la comparación de todos los caso para aletas corrugadas COR3 (5, 7, 9 y 11). Al analizar la gráfica correspondiente al número de Nusselt, se debe destacar que lo valores correspondiente a la curva Nud 11A son superiores a los otros, ya que muestra una tendencia marcada a incrementar el valor del Nud en la medida que aumenta el número de Reynolds debido a que presenta una pendiente mayor que los demás casos.

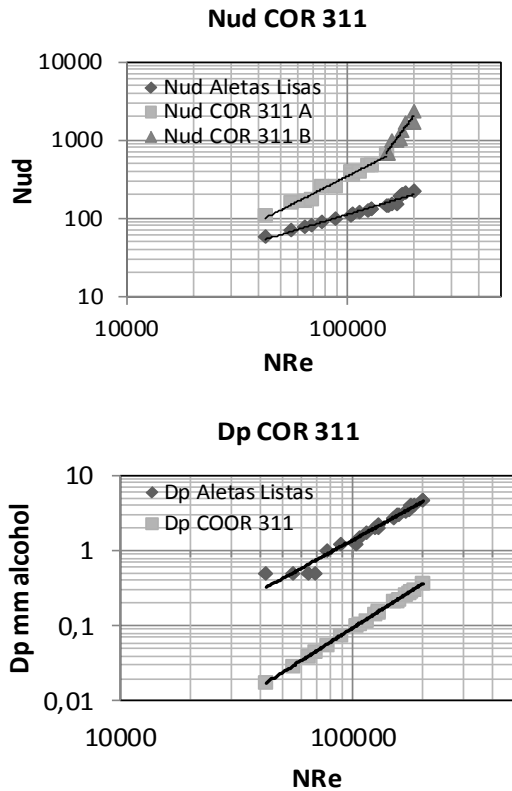


Fig. 8. Número de Nusselt y caída de presión COR311

Adicional a esto se puede observar que en la medida que se aumenta el número de aletas por unidad de longitud se incrementa también el número de Nusselt. En la gráfica correspondiente a la caída de presión se aprecian ligeras diferencias, pareciera existir una predisposición a que en la medida que se aumenta el número de Reynolds la caída sea independiente del número de aletas por unidad de longitud.

4 Comparación COR2 y COR3

Dentro de los objetivos que persigue la investigación realizada se encuentra la comparación entre los diferentes valores obtenidos experimentalmente para los corrugados COR2 y COR3, donde los resultados de COR 2 fueron reportados por el autor en el 2006 en función del coeficiente de transferencia de calor por convección (López 2006). Este cotejo se hace para las mismas condiciones de cantidad de aletas por unidad de longitud y de trabajo.

A continuación se muestra en la figura 10 la comparación de los corrugados COR25 y COR35, tanto para el número de Nusselt como para la caída de presión.

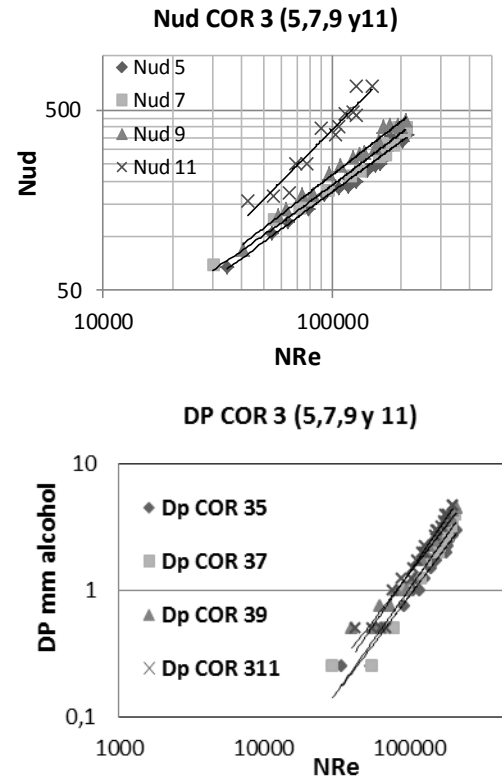


Fig. 9. Número de Nusselt y caída de presión COR3 (5, 7, 9 y 11)

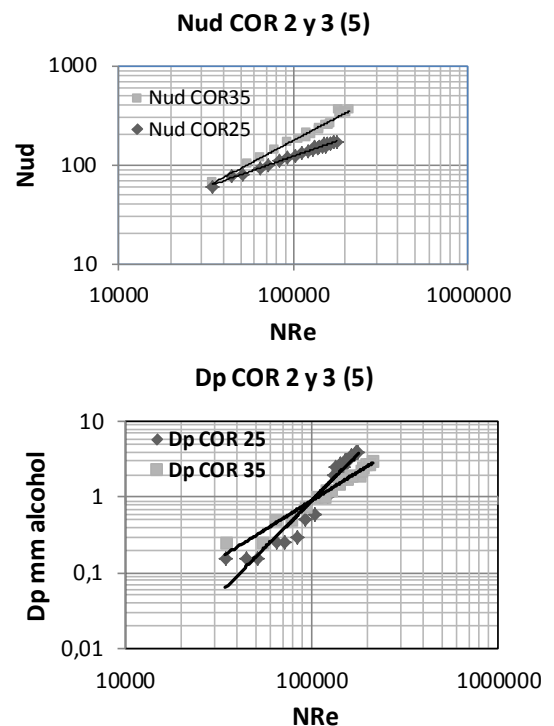


Fig. 10. Número de Nusselt y caída de presión COR2 y 3 (5)

De la gráfica del número de Nusselt se puede concluir que para valores por debajo de NRe en el orden de 40.000 el Nud es independiente del corrugado, mientras que para valores por encima, el Nud de COR35 es superior al de COR25.

En cuanto a la caída de presión se observa que para valores de NRe menores a 100.000 el corrugado COR35 presenta la mayor caída de presión comparado con el corrugado COR25. Para valores superiores se invierte y la caída de presión para el corrugado COR25 es mayor que para COR35.

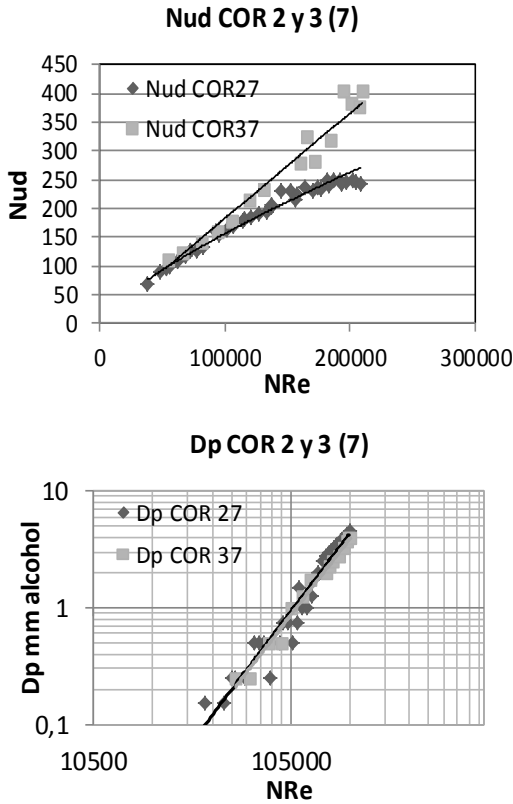


Fig. 11. Número de Nusselt y caída de presión COR 2 y 3 (7).

En la gráfica de la figura 11 se puede verificar que para valores de número de Reynolds inferiores a 80.000 el Nud es independiente del corrugado y prácticamente igual, mientras que para valores superiores, el corrugado COR37 presenta una pendiente mayor que el corrugado COR27 por ende un valor superior del Nud . En cuanto la caída de presión las diferencias tanto para el corrugado COR27 y COR37 son despreciables.

En el análisis de las gráficas de la figura 12 se aprecia que el corrugado COR39 presenta una pendiente ligeramente mayor, lo que implica que el Nud es superior comparado con el corrugado COR29. En la gráfica de diferencia de presión, el mayor valor lo presenta el corrugado COR39 para valores bajos del NRe comparado con el corrugado COR29, mientras que para valores altos se hace indepen-

diente del corrugado

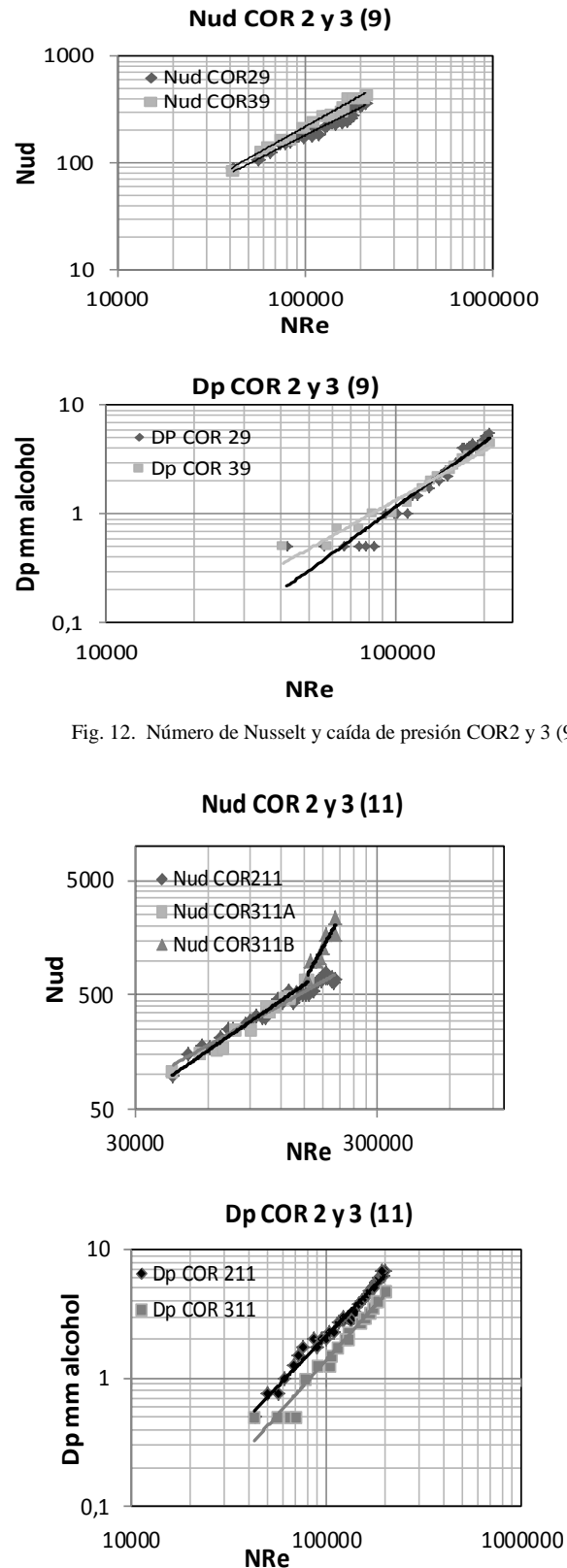


Fig. 12. Número de Nusselt y caída de presión COR2 y 3 (9).

Fig. 13. Número de Nusselt y caída de presión COR2 y 3 (11).

Al analizar las gráficas de la figura 13 se puede observar que para valores del número de Reynolds por debajo de 150.000 el número de Nusselt obtenido para los dos niveles de corrugados es prácticamente idéntico. Para valores superiores al NRe referenciado, el número de Nusselt aumenta en gran medida debido a la diferencia notable de la pendiente. Si se analiza la gráfica de caída de presión es evidente que el corrugado que presenta mayor caída de presión es el COR211 comparado con el corrugado COR311.

5 Análisis de Resultados

De los resultados presentados en este artículo se puede inferir lo siguiente: 1) el corrugado COR3 incrementa el número de Nusselt y la caída de presión del lado de las aletas comparando con los valores calculados con el procedimiento propuesto para aletas anulares lisas por (Kern 1999). 2) El análisis de los resultados experimentales para COR3 ha mostrado que el incremento del número de Nusselt correspondientes a valores bajos del número de Reynolds es superior al 60 %, mientras que para números de Reynolds altos superan en algunos casos el 900 %, comparado con los valores determinados para aletas anulares lisas, esto se representa en la tabla 3. 3) En la mayoría de los casos comparados para corrugado COR2 y COR3 se encontró que el número de Nusselt es de mayor magnitud para el corrugado COR3 que el determinado para COR2 en condiciones de trabajo donde el número de Reynolds era aproximadamente superior a 100.000 y que para valores por debajo resultan ser independientes del corrugado. 4) En cuanto a la caída de presión para los casos de corrugado COR2 (9 y 11) y COR3 (9 y 11) se observa una tendencia a ser independiente del corrugado para número de Reynolds por encima de los 100.000. Para el caso COR27 y COR37 la caída de presión es independiente del corrugado y para el tipo COR25 y COR35 es superior el corrugado COR25 para valores de Reynolds superiores a 100.000. 5) El banco utilizado para las pruebas experimentales de los distintos equipos, fue verificado al ensayar un intercambiador de banco de tubos circulares sin aletas, el cual se encuentra en diferentes bibliografías de transferencia de calor. La Incertidumbre en el Banco de Prueba está en el orden de 7,5 % para valores pequeños de número de Nusselt y de 3,45% para valores grandes.

6 Expresiones Matemáticas

A partir de la metodología empleada por (López 2006), se presentan las expresiones matemáticas en función de parámetros tales como: el número de Reynolds local (Re), número Prandtl (Pr), constantes y propiedades de los fluidos. El número de Nusselt esta expresado en función del coeficiente de transferencia de calor por convección (h), el diámetro interno del tubo (d) y la conductividad térmica del fluido (k). Las variables c , n , C_f y m son constantes de las

ecuaciones 1 y 2, tabuladas en la Tablas 4 y Tabla 5.

Tabla 3 Incremento del Nusselt de Aletas helicoidales corrugadas vs anulares lisas.

Tipo de corrugado	Incremento Nusselt NRe bajos	Incremento Nusselt NRe altos
COR 35	66,92	365,64
COR 37	128,21	245,15
COR 39	68,00	187,77
COR 311	90,62	965,28

$$Nud = c \cdot Re^n \cdot Pr^{1/3} \quad (1)$$

$$Nud = \frac{hd}{k} \quad (2)$$

$$f = C_f \cdot Re^m \quad (3)$$

Tabla 4 Constante para la ecuación de Nud COR3

	C_f	m
COR35	20.494	-0.6305
COR37	0.1296	0.1767
COR39	52.372	-0.5498
COR311	5.487	-0.2544

Tabla5 Constantes para la Ecuación del coeficiente de fricción COR3

	c	n
COR35	0,0854	1,027
COR37	0,1577	0,9807
COR39	0,107	1,007
COR311 A	0,0179	1,3762
COR311 B	5,875E-07	2,7972

Valores válidos para intervalos de Reynolds comprendidos entre $40.000 \leq NRe \leq 200.000$. Los valores de estas constantes se obtuvieron con un procedimiento matemático sencillo. Los coeficientes de correlación están en el orden del 98% lo que refleja una buena correlación de los modelos matemáticos con el fenómeno físico.

7. Consideraciones finales

En el presente trabajo se demostró que al conformar un corrugado COR3 a la superficie de las aletas helicoidales el número de Nusselt se incrementa y por ende el coeficiente de transferencia de calor por convección, al igual que se demostró en el trabajo reportado por (López 2006) para corrugado COR2. De igual forma se presenta un incremento en la caída de presión del lado del aire comparado con los valores teóricos referidos en las bibliografías para aletas anulares lisas. En la comparación de los caso COR2 y COR3, se pudo concluir que los valores de número de Nusselt y de caída de presión para el segundo, son superiores a los reportados para el primer caso (López 2006) y se podría inferir que al disminuir el paso entre dientes de los engranajes, con los que se realizan el corrugado, se aumenta el número de Nusselt y por consiguiente el coeficiente convectivo. En cuanto la caída de presión es prácticamente igual para la mayoría de los casos de corrugados estudiados, siendo en algunos pocos menor en el corrugado COR3 que en los corrugados COR2 para valores altos de número de Reynolds. Estos resultados sugiere que se deben diseñar y fabricar intercambiadores de calor tipo flujo cruzado al utilizar tubos circulares con aletas helicoidales corrugas con las características geométricas especificadas para el caso COR311 pues se obtienen mayores números de Nusselt y menores caídas de presión comparado con COR211. La incertidumbre en el banco tiene poco efecto sobre los valores obtenidos del número de Nusselt. Las expresiones matemática presentadas en este trabajo representa en buena medida el fenómeno físico estudiado.

Referencias

Berg Alfred J, 1926, Heat Exchanger Element, United States Patent office, No. 2.025.036
 Chapman Everett, 1947, Finned element for thermal or heat transfer purposes, United States Patent office, No. 2.667.337.
 Holman J P, 1999, Transferencia de Calor, McGraw Hill México.
 Incropera F.P. and DeWitt D.P., 1996, Fundamentos de Transferencia de Calor, Prentice Hall, México, Cuarta Edición.
 Kern Donald Q, 1999, Procesos de Transferencia de Calor, Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México, Trigésima Primera Reimpresión, Capítulo 16, pp. 616-643.
 López P E, 2006, Efecto del corrugado de las aletas helicoidales sobre el flujo de calor, Ciencia e Ingeniería. Facultad de Ingeniería de la ULA, República Bolivariana de Venezuela, Mérida, Vol 27, No. 3, pp. 129-135.
 Niemchek Milwaukee Louis, 1938, Finned structure and method of making same, United States Patent office, No. 2.117.445.
 Nir A, 1991, Heat Transfer and Friction factor Correla-

tions for Cross flow Over Staggered Finned Tube Bank. Heat Transfer Engineering, Vol 12, N° 1 pp. 43-58.
 Pacheco Vega Arturo, Sen Mihir, Yang K.T., Rodney L. McClain, 2001, Neural Network Analysis of Fine-tube refrigerating Heat Exchanger With Limited Experimental Data, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp.763-770.
 Pysmennyy Yevegen, Polupan G, Mariscal I. Sánchez C, F., 2007, Manual de Cálculo para Intercambiadores de Calor y banco de tubos aleteados, Editorial REVERTE, México.
 Taborek J, 1985, Bond Resistance and Design Temperatures for High-Finned Tubes- A Reappraisal, The American Society of Mechanical Engineers, from Proceedings of the Thermal/Mechanical Heat Exchanger Design pp. 49-58

Recibido: 04 de enero de 2014

Aceptado: 06 de junio de 2015

López, Emilio: Profesor Agregado del Departamento de Física de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador Venezuela, Estado Aragua, Maracay. Ingeniero Mecánico. Magister en Ingeniería Mecánica.

Simeone, Rolando: Dr. en Ciencias Técnicas, Profesor Titular Universidad de Holguín, Cuba, Ingeniero Mecánico. Especialista en: Diseño Asistido por Computadoras, Programación Funcional, Eficiencia Energética y Energías Renovables.

Iturriza, Hermes: Profesor Asociado del Departamento de Física de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador Venezuela, Estado Aragua, Maracay. Profesor de Física. Magister en Diseño y Tecnología Educativa. Doctorado en Educación.